



Performa Sistem Integrasi PEM *Fuel cell* dan PEM Elektrolizer : Perangkat Energi Carrier di Indonesia

Ramli Sitanggang*, Wahid Muchlason, dan Aprin Pratama Lubis

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik Industri, UPN "Veteran" Yogyakarta
Jl. Padjajaran 104 (Lingkar Utara), Condongcatur Yogyakarta

*E-mail: ramlisitanggang@upnyk.ac.id

Abstract

Indonesia has a landmass of approximately 1.9 million km² is composed of 17.5 thousand large and small island surrounded by seas and oceans around 3.2 million km². Indonesia's geographical conditions require specific transport and distribution of energy by energy carrier method of a primary source of energy to regions in Indonesia. In recent years, research has developed a PEM fuel cell for power plants, and PEM electrolyser for cheap Hydrogen production, especially electrolysis of water. In an integrated system, specifically PEM fuel cell and PEM electrolyser not much is explained about the influence of voltage, temperature, and time against the performance of the integrated system. Based on the description above, the performance system integration of PEM fuel cell with PEM electrolyser needed in the system integration. Converter power PEM electrolyser into Hydrogen followed by conversion Hydrogen PEM fuel cell into electric power has become the specific operating integration lines. Performance characteristics of operating system integration line shows the higher power generated PEM fuel cell then PEM electrolyser power needed the higher. On the application of the operating line Integration PEM fuel cell and PEM electrolyser can be applied at low temperature until high temperature (25°C until 100°C).

Keywords: Performance of PEM electrolyser, Performance of PEM fuel cell, Modeling Integration, Energy Carrier

Pendahuluan

Indonesia memiliki *feedstock* energi terbarukan yang sangat besar. Wilayah Indonesia terdiri dari daratan sekitar 1,9 juta km² yang tersusun dari 17,5 ribu pulau besar dan kecil yang dikelilingi lautan dan samudra sekitar 3,2 juta km². Kondisi geografis yang spesifik ini sangat menguntungkan karena sistem transportasi dan distribusi energi melalui tol lautan dan samudra sangat layak. Untuk menurunkan biaya angkut energi, metode yang sesuai untuk diterapkan adalah energi carrier berbasis hidrogen. Energi carrier tenaga surya, angin, dan hidro berbasis gas hidrogen perlu teknologi elektrolizer untuk mengubah energi listrik dari suatu sumber energi primer menjadi hidrogen, selanjutnya didistribusikan ke berbagai wilayah di Indonesia yang sudah dilengkapi dengan teknologi konversi hidrogen menjadi listrik yaitu *fuel cell*. Integrasi PEM elektrolizer untuk konversi listrik menjadi gas hidrogen dengan PEM *fuel cell* yang digunakan untuk konversi hidrogen menjadi tenaga listrik. Sistem terintegrasi PEM elektrolizer dan PEM *fuel cell* belum maksimal dijelaskan tentang model yang berpengaruh terutama karakteristik performanya. Makalah ini meneliti model sederhana untuk menyatakan karakteristik performa sistem integrasi PEM elektrolizer dengan PEM *fuel cell*.

PEM elektrolizer adalah suatu perangkat yang terdiri dari komponen membran elektrolit dan elektroda untuk mengubah air menjadi hidrogen. Membran pada alat ini memiliki tujuan ganda, sebagai perangkat pemisahan gas dan konduktor ion (proton). Performa dari PEM elektrolizer pada suhu 353 K (80°C) dan tekanan 1-13,6 atm, menunjukkan karakteristik pada tegangan 1,7 V dengan densitas arus 1,5 A/cm² (Han dkk., 2015). Pada kondisi yang sama, PEM elektrolizer menunjukkan karakteristik dengan 10,5 V didapat 2,4 A/cm² tetapi pada 0,03 V didapat 0,5 A/cm² (Yang dkk., 2015) (Ito dkk., 2012). Pada kondisi suhu 75°C dapat menghasilkan hidrogen 90 liter/jam pada tegangan 2,8 V dan densitas arus 0,6 A/cm² (Siracusano dkk., 2011). Performa PEM elektrolizer pada tekanan 1-130 bar umumnya tegangan 1,7 V dan densitas arus 1 A/cm² (Millet dkk., 2010). Pada kondisi yang sama untuk memproduksi hidrogen, performa yang paling rendah adalah 0,12 V dengan arus listrik sebesar 0,075 A/cm² (Corona-Guinto dkk., 2013). Jadi, berdasarkan penelitian-penelitian tersebut diatas performa PEM elektrolizer pada tegangan 0,03 – 10,5 V dengan densitas arus 0,075 – 2,4 A/cm². Jika PEM elektrolizer dan PEM *fuel cell* terintegrasi, performa sistem terintegrasi pada kondisi suhu 65°C yang mana karakteristik PEM elektrolizer pada tegangan 1,5 V dan densitas arus 0,5 A/cm², serta karakteristik PEM *fuel cell* pada tegangan 0,6 V dan densitas arus

1 A/cm² (Özgirgin dkk., 2015). Pada kondisi yang sama, telah diteliti PEM elektrolizer pada tegangan 1,55 V dan densitas arus 1 A/cm², sedangkan PEM *fuel cell* pada tegangan 0,6 V dan densitas arus 1 A/cm² (Devrim dkk., 2016). Jadi dalam penelitian tersebut di atas pada suhu 65°C sistem terintegrasi memiliki tegangan 0,6 - 1,55 V dengan densitas arus sebesar 0,5 - 1 A/cm².

Penelitian tentang teknologi PEM *fuel cell* penghasil energi yang telah dilaporkan, meliputi pengaruh suhu, tekanan parsial hidrogen dan oksigen, serta efisiensi. Menurut Abderezzak dkk. (2014) didapatkan performa PEM *fuel cell* yang terbaik pada suhu 80 °C, dengan tekanan 3 bar dan 100% kelembaban relatif. Untuk menghasilkan energi listrik dari PEM *fuel cell*, dapat digunakan hidrogen yang berasal dari PEM elektrolizer. Menurut hasil studi PUSPIPTEK, didapatkan bahwa jika hidrogen sebagai sumber bahan bakar penghasil listrik dengan menggunakan *fuel cell* sebagai generator pengubahnya akan membutuhkan hidrogen rata-rata 10 liter/min untuk menghasilkan 1 kW listrik. Pada beberapa tahun terakhir, telah dikembangkan penelitian PEM *fuel cell* dan PEM elektrolizer. PEM *fuel cell* adalah perangkat pembangkit tenaga listrik dengan cara kimia yang menggunakan hidrogen dan oksigen. PEM *fuel cell* terdiri dari lapisan difusi gas, lapisan elektrokatalis, membran, dan bipolar plate. Himpunan dari komponen-komponen disebut *stack fuel cell* yang pengoperasiannya menghasilkan listrik, panas, dan air pada suhu rendah 25°C hingga suhu tinggi sekitar 200°C. Pada suhu rendah yaitu 25°C dan 1 atm, performa PEM *fuel cell* memiliki tegangan 1,182 V dan densitas arus sebesar 0,4 A/cm² (Gonnet dkk., 2012). Pada kondisi yang sama *fuel cell* stabil pada tegangan 0,7 V dan densitas arus sebesar 0,622 A/cm², tetapi pada suhu 60°C stabil pada tegangan 0,6 V dengan densitas arus sekitar 0,3928 A/cm² (Ou dkk., 2017) (Chaisubanan dkk., 2017). Selanjutnya karakteristik yang stabil didapatkan densitas arus sekitar 0,37 - 1,25 A/cm² untuk suhu 55°C sampai dengan 67°C. Untuk kondisi suhu 253-353 K dan tekanan 2,5 - 4 atm, performa karakteristik PEM *fuel cell* menunjukkan densitas arus 1 A/cm² (Abderezak dkk., 2014) (Kurnia dkk., 2017) (Mert dkk., 2012). Jadi, dalam penelitian tersebut diatas pada kondisi stabil yaitu 0,6 V sampai dengan 0,7 V diperoleh densitas arus 0,37-1,25 A/cm². Pada suhu tinggi yaitu 160-200°C dengan tekanan 101,3-200 kPa, performa dari PEM *fuel cell* yang menggunakan PBI MEA, TPS MEA untuk konsentrasi hidrogen yang digunakan 30-100%, didapatkan karakteristik *fuel cell* pada tegangan 1 V dan densitas arus sebesar 0,8 A/cm² (Waller dkk., 2016). Pada kondisi yang sama didapatkan 0,65 V dan 0,12 A/cm², sedangkan performa dari PEM *fuel cell* pada suhu 160°C dengan tekanan 1 atm untuk konsentrasi yang digunakan 30% V/V oksigen didapatkan karakteristik *fuel cell* pada tegangan 0,7 V dan densitas arus 0,3 A/cm² (Zhang dkk., 2015) (Pinar dkk., 2015). Jadi, dalam penelitian tersebut diatas pada suhu tinggi didapatkan tegangan 0,65 V sampai dengan 1 V diperoleh densitas arus 0,12 - 0,8 A/cm². Dalam sistem terintegrasi yaitu PEM elektrolizer dan PEM *fuel cell* yang terintegrasi belum dijelaskan tentang pengaruh tegangan dan waktu terhadap performa sistem terintegrasi. Oleh karena hal tersebut, dilakukan penelitian pada sistem terintegrasi untuk suhu tertentu.

Metode Penelitian

Konversi Listrik PEM Elektrolizer menjadi Hidrogen

PEM elektrolizer berguna untuk menguraikan senyawa air (H₂O) menjadi oksigen (O₂) dan gas hidrogen (H₂) dengan menggunakan arus listrik dari photovoltaic. Persamaan yang menyatakan karakteristik elektrolizer (persamaan Nerst) dinyatakan sebagai berikut:

$$V_{\text{Nerst}} = V_{\text{rev}}^0 + \frac{RT}{nF} \cdot \left[\ln \left(\frac{P_{\text{H}_2} \cdot P_{\text{O}_2}^{0,5}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \right] \quad (1)$$

Dimana V_{Nerst} adalah tegangan sel reversibel, R yaitu konstanta gas ideal, P adalah tekanan parsial. Menurut hasil eksperimen, peningkatan suhu operasi dari 40-80°C akan menurunkan tegangan dan menyebabkan peningkatan performa PEM elektrolizer (Abderezak dkk., 2014). Semakin lama waktu berlangsungnya elektrolisis, maka volume H₂ yang dihasilkan akan semakin banyak. Secara teoritis hal tersebut dapat ditinjau dari Hukum Faraday 2.

$$V_{\text{H}_2\text{teoritis}} = \frac{I \cdot t \cdot V_m}{z \cdot F} \quad (2)$$

Dimana, I adalah arus listrik (mA), t adalah waktu (s), n adalah jumlah mol, V_m adalah volume molar (ml.mol⁻¹), V adalah volume hidrogen (ml), F adalah konstanta Faraday, z adalah jumlah mol elektron yang ditransfer pada saat reaksi. Q adalah beban listrik (C). Persamaan (2) menunjukkan produksi H₂ yang akan dikonversikan *fuel cell* menjadi listrik kembali akan dipengaruhi densitas arus dan waktu. Semakin besar densitas arus yang digunakan pada PEM elektrolizer, semakin meningkat dan akan mengubah produksi H₂ terhadap waktu. Perubahan tersebut dipresentasikan dengan persamaan (3) yang diturunkan dari persamaan (2).

$$\frac{dV_{\text{H}_2}}{dt} = C \cdot I \quad (3)$$

Dimana $C = \frac{R \cdot T}{z \cdot F \cdot P}$

Konversi Hidrogen PEM *Fuel cell* menjadi Tenaga Listrik

Performa PEM *fuel cell* dapat dinyatakan dengan persamaan Tafel. Persamaan ini telah teruji pada berbagai PEM *fuel cell* dan penyimpangan tidak besar untuk pengaplikasian. Telah dilaporkan berbagai penelitian penerapan semi empiris untuk lapisan elektroda dan berbagai jenis membran (O'hayre, 2006). Pemodelan Tafel sangat

dipengaruhi oleh struktur lapisan PEM *fuel cell* dan operasional, terutama pengaturan kelembapan air. Pada suhu rendah ditemukan penyerapan balik air dari lapisan difusi gas. Pada persamaan Tafel dengan menggunakan Nafion® 112 dan 115 sebagai berikut:

$$V = E_r - b \log \frac{i}{i_0} + b \log \left(1 - \frac{i}{i_0} \right) - iR \quad (4)$$

Dalam penelitian membran PEM *fuel cell* yang digunakan adalah Nafion®. Penyerapan O₂ dibagian katode sangat tinggi, sehingga digunakan persamaan sebagai berikut:

$$V = E_r - b \log \frac{i}{i_0} - iR \quad (5)$$

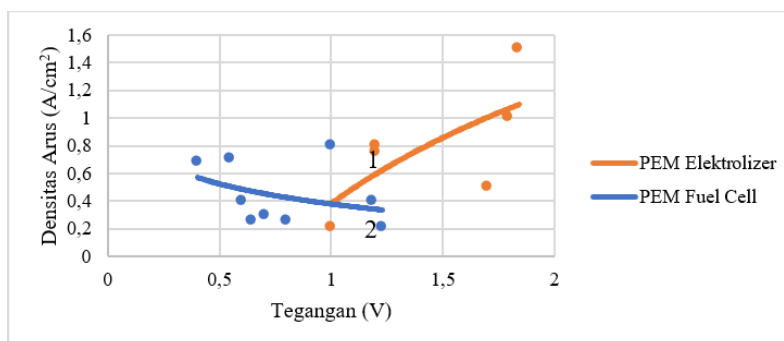
E_r merupakan tegangan sel reversibel dalam sirkuit terbuka (V) yang didekati dengan persamaan Nerst. $b \log(i/i_0)$ menunjukkan Vlosses aktivasi reaksi. Bagian iR adalah Vlosses karena adanya tahanan internal PEM *fuel cell*. Tahanan luar PEM *fuel cell* jauh lebih besar dari tahanan internalnya, sehingga iR dapat diabaikan. Dengan demikian persamaan untuk menyatakan performa PEM *fuel cell* yaitu:

$$V = E_r - b \log \frac{i}{i_0}, \text{ dengan } b = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (6)$$

b merupakan kecenderungan polarisasi aktivasi reaksi. i_0 merupakan kerapatan arus pada tegangan reversibel, sedangkan i merupakan kerapatan arus setelah terjadi tegangan reversibel. α adalah koefisien transfer gas yang dipengaruhi oleh reaksi dan bentuk elektroda. Untuk PEM *fuel cell* yang menggunakan gas H₂, nilai α secara teoritis adalah 0,5. R merupakan hambatan total listrik di dalam *fuel cell*.

Integrasi elektrolizer dengan *fuel cell*

Bagian-bagian sistem terintegrasi adalah PEM elektrolizer yang terhubung dengan PEM *fuel cell*. Performa masing-masing bagian yang terintegrasi dapat diketahui dengan *mapping* dan analisis sebagai berikut:



Gambar 1. Performa sistem terintegrasi

Gambar 1(1) menunjukkan temuan PEM *fuel cell* dari para peneliti. Jika dilakukan pendekatan pada peta PEM *fuel cell* dengan metode *trendline* option logaritmik, didapatkan hubungan empiris densitas arus dengan tegangan yaitu semakin tinggi tegangan pengoperasian PEM *fuel cell*, maka densitas arus semakin rendah. Gambar 1 (2) menunjukkan temuan PEM elektrolizer dari para peneliti. Jika dilakukan *trendline* option logaritmik, didapatkan hubungan empiris densitas arus dengan tegangan yaitu semakin tinggi tegangan, maka densitas arus juga semakin tinggi. Berdasarkan *trendline* pada gambar 1, terlihat densitas arus yang dibutuhkan PEM elektrolizer lebih besar dari densitas arus yang dihasilkan oleh PEM *fuel cell*. Misalkan sistem terintegrasi dioperasikan pada PEM elektrolizer 1V membutuhkan 0,75 mA/cm² untuk menghasilkan hidrogen. Hidrogen tersebut masuk ke dalam PEM *fuel cell* menghasilkan densitas arus sebesar 0,35mA/cm² dan H₂O. H₂O masuk PEM elektrolizer untuk diubah menjadi hydrogen kembali. Uraian siklus ini perlu dinyatakan dengan persamaan performa sistem integrasi. Jika pendekatan awal pemodelan semi empirik performa sistim integrasi PEM *fuel cell* dengan PEM elektrolizer untuk aplikasi dilakukan melalui substitusi persamaan yang tersedia didapatkan persamaan (7). Persamaan ini disebut garis operasi sistem integrasi PEM elektrolizer dengan PEM *fuel cell*.

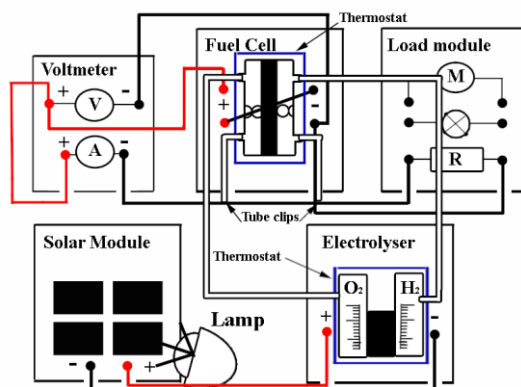
$$i = i_0 \cdot 10^{D + \ln(V) + \ln(t)} \quad (7)$$

$$D = A - B - C + \ln \left(\frac{V_m}{R_z F} V_{O_2}^{0.5} \right)$$

$$A = \frac{E_r}{b}; B = \frac{V_{rev}^0}{b}; C = \ln(V_{H_2O} (nRT)^{0.5})$$

Faktor-faktor yang berpengaruh pada performa sistem integrasi adalah bilangan A untuk menyatakan tegangan reversibel yang ditemukan dalam sirkuit terbuka terhadap kecenderungan aktivasi reaksi kimiadari PEM *fuel cell*. Bilangan B untuk menyatakan tegangan reversibel yang ditemukan dalam sirkuit terbuka terhadap kecenderungan

aktivasi reaksi kimia dari PEM elektrolizer. C menyatakan keadaan desain sistem integrasi. Selain itu, laju alir H_2O dan laju alir O_2 tentu akan berpengaruh pada performa karena semakin besar laju alir/volume H_2O maka volume H_2 yang dihasilkan akan semakin besar dan jika volume H_2 yang dihasilkan besar maka listrik yang dihasilkan *fuel cell* akan semakin besar juga. Volume molar H_2 (V_m) yaitu volume per 1 mol H_2 . Volume molar yang masuk berbanding lurus dengan energi listrik yang dihasilkan *fuel cell*, jika V_m semakin besar maka energi listrik akan semakin besar. Waktu pada *fuel cell* maupun elektrolizer sangat berpengaruh pada jumlah energi listrik yang dihasilkan. Semakin lama waktu berlangsungnya elektrolisis maka volume H_2 yang dihasilkan akan semakin banyak dan jika volume H_2 semakin banyak maka energi listrik yang dihasilkan *fuel cell* pun akan semakin besar. Pada model integrasi ini, dapat diduga bahwa semakin tinggi tegangan, semakin tinggi juga densitas arus pada PEM *fuel cell* dan PEM elektrolizer. Arus listrik yang dibutuhkan PEM elektrolizer lebih besar dari yang dihasilkan oleh PEM *fuel cell*. Semakin besar dari perubahan volume H_2 terhadap waktu, semakin besar juga arus yang diperlukan.



Gambar 2. Modul operasi sistem integrasi

Energi listrik yang dihasilkan photovoltaic dialirkan ke PEM elektrolizer untuk menghasilkan hidrogen dialirkan ke PEM elektrolizer, untuk menghasilkan hidrogen. Hidrogen digunakan pada PEM *fuel cell* untuk menghasilkan listrik. Load yang digunakan pada sistem integrasi PEM *fuel cell* dan PEM elektrolizer adalah kipas. Pengoperasian PEM *fuel cell* pada suhu rendah mendekati 28, 50, 80, dan 100°C.

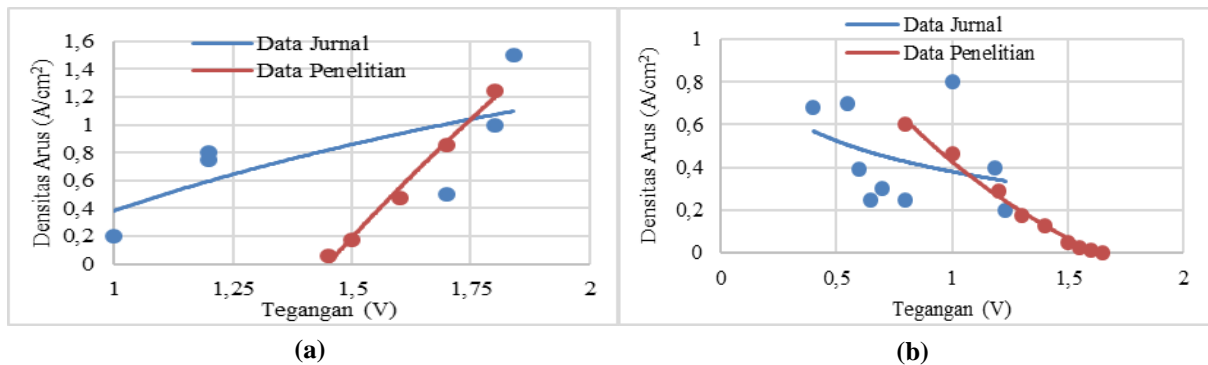
SOP Sistem Terintegrasi

- Pasang rangkaian alat seperti pada Gambar 2, periksa apakah kabel penghubung antara tabung di elektrolizer dan *fuel cell* sudah terpasang dengan benar.
- Atur tombol pada kipas ke 'OPEN'.
- Masukkan air ke dalam tabung elektrolizer sampai tanda 0 ml.
- Atur photovoltaic agar arus yang dihasilkan konstant.
- Posisi photovoltaic dan lampu harus tetap selama proses berlangsung, agar produksi hidrogen tetap stabil.
- Purge sistem yang terintegrasi (electrolyzer, *fuel cell*, dan tabung) dengan gas H_2 yang dihasilkan elektrolizer.
- Atur hambatan pada kipas, jika kipas berputar maka membuktikan bahwa arus/gas mengalir.
- Catat data pembacaan (tegangan, arus, volume H_2 , tahanan load listrik) pada waktu yang berbeda.
- Ulangi langkah b-h dengan nilai tegangan dan suhu yang berbeda-beda.

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik PEM Elektrolizer dan PEM *Fuel cell*

Gambar 3 menunjukkan karakteristik PEM elektrolizer dan PEM *fuel cell* dari penelitian dan beberapa laporan peneliti lainnya. Jika dilakukan *trendline option* logaritmik. Gambar 3(a) menunjukkan karakteristik PEM elektrolizer, dan Gambar 3(b) menunjukkan karakteristik PEM *fuel cell*.

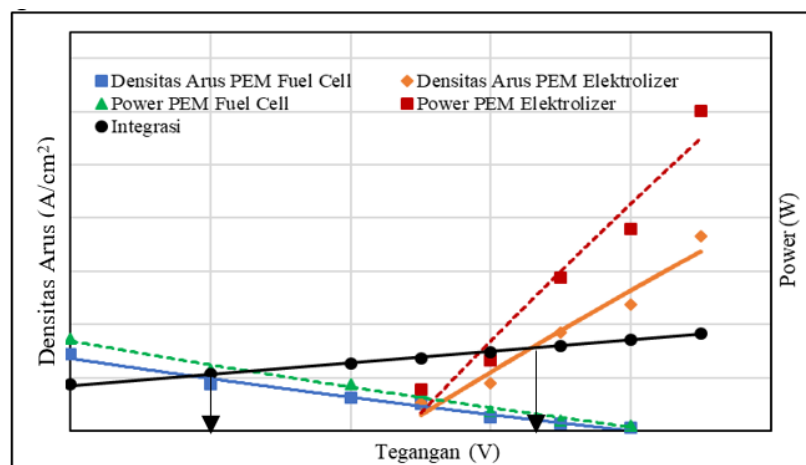


Gambar 3. Perbandingan performa (a) PEM elektrolizer dan (b) PEM fuel cell dari data jurnal dan penelitian.

Berdasarkan grafik di atas, data penelitian PEM elektrolizer dan PEM *fuel cell* yang telah dilakukan relevan dengan hasil peneliti-peneliti lain. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa alat PEM elektrolizer dan PEM *fuel cell* yang digunakan masih sesuai untuk pemodelan sistem integrasi.

Karakteristik Garis Operasi Sistem Integrasi

Gambar 4 menunjukkan karakter performa sistem integrasi PEM elektrolizer dengan PEM *fuel cell*, nilai suhu dimasukkan ke *trendline* integrasi yang dipresentasikan dengan persamaan (7) maka akan didapatkan karakteristik garis operasi sistem terintegrasi.

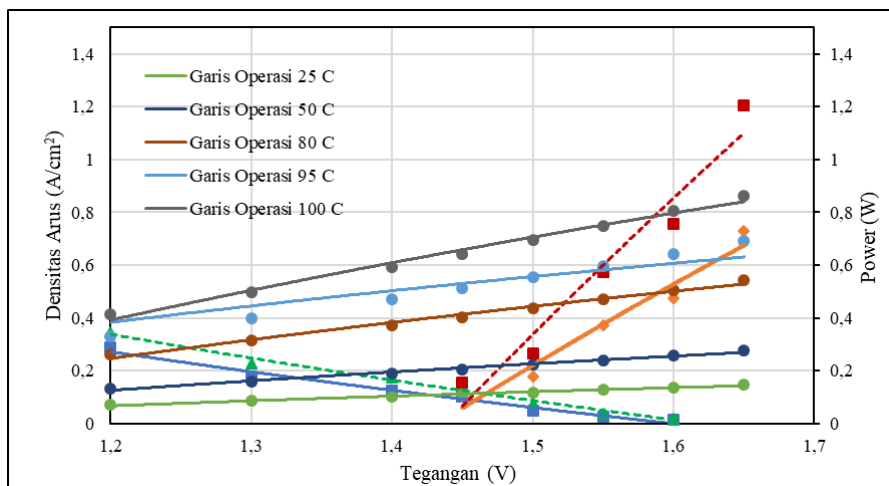


Gambar 4. Karakteristik sistem terintegrasi

Berdasarkan grafik diatas, didapatkan hubungan antara tegangan dengan arus dan power pada sistem terintegrasi. Semakin besar tegangan pada sistem integrasi, maka semakin besar pula arus dan power yang dihasilkan. Hubungan lainnya menunjukkan semakin tinggi power yang dihasilkan PEM *fuel cell*, maka power PEM elektrolizer yang diperlukan semakin tinggi

Aplikasi Integrasi

Pada saat PEM *fuel cell* beroperasi pada suhu tertentu terjadi reaksi reduksi oksigen dan oksidasi hidrogen pada dua elektroda yang dipisahkan oleh sebuah membran. PEM *fuel cell* dipengaruhi variable dan tekanan parsial hidrogen maupun oksigen, variabel yang paling berpengaruh adalah suhu. Suhu mempengaruhi kinetika reaksi, perpindahan massa hidrogen, konduktivitas lapisan gas difusi elektroda, dan perpindahan panas. Dalam makalah ini batasan yang digunakan dalam aplikasi garis operasi integrasi yaitu jika diinginkan suhu operasi tertentu pada PEM *fuel cell*, suhu dimasukkan ke *trendline* integrasi yang dipresentasikan dengan persamaan (7) maka akan didapatkan kecenderungan V_{losses} PEM *fuel cell*. Berikut aplikasi sistem integrasi pada suhu tertentu :



Gambar 5. Karakteristik sistem terintegrasi pada suhu 28 °C, 50°C, 80°C, 95 °C dan 100°C

Gambar 5 menunjukkan aplikasi integrasi, didapatkan hubungan semakin besar suhu operasi yang diinginkan, maka semakin besar power yang dihasilkan. Terlihat pada garis operasi 95°C sudah mencapai puncak kurva, sehingga pada suhu 100 °C berdasarkan garis operasi yang dihasilkan melebihi atau berada diatas kurva karakteristik sistem integrasi. Hal ini disebabkan karena pada suhu 100 °C kapasitas PEM elektrolizer yang digunakan tidak mencukupi, sehingga dibutuhkan kapasitas PEM elektrolizer yang lebih besar untuk memperoleh hasil yang diinginkan.

Kesimpulan

Konversi listrik PEM elektrolizer menjadi hidrogen diikuti dengan hidrogen PEM *fuel cell* menjadi tenaga listrik memiliki garis operasi integrasi. Karakteristik performa garis operasi sistem integrasi menunjukkan semakin tinggi power yang dihasilkan PEM *fuel cell*, maka power PEM elektrolizer yang diperlukan semakin tinggi. Pada aplikasi garis operasi integrasi PEM *fuel cell* dan PEM elektrolizer dapat diterapkan pada suhu 28 °C sampai 95 °C, dengan hubungan semakin besar suhu operasi maka semakin besar pula power yang dihasilkan.

Daftar Pustaka

- Abderezak B., Khelidj B., & Abbes M. T. Performances prediction study for proton exchange membrane *fuel cells*. *Int. J. Hydrogen Energy* 2014; 39 (27): 15206–15214.
- AlZahrani A. A., Dincer I. Thermodynamic and electrochemical analyses of a solid oxide electrolyzer for hydrogen production, *Int. J. Hydrogen Energy* 2017; 42 (33): 21404–21413.
- Becker S., Karri V. Predictive models for PEM-electrolyzer performance using adaptive neuro-fuzzy inference systems, *Int. J. Hydrogen Energy* 2010; 35 (18): 9963–9972.
- Chaisubanan N., Maniwan W., Hunsom M. Effect of heat-treatment on the performance of PtM/C (M = Cr, Pd, Co) catalysts towards the oxygen reduction reaction in PEM *fuel cell*, *Energy* 2017; 127: 454–461.
- Corona-Guinto J.L., dkk. Performance of a PEM electrolyzer using RuIrCoOx electrocatalysts for the oxygen evolution electrode, *Int. J. Hydrogen Energy* 2013; 38 (28): 12667–12673.
- Devrim Y., Bilir L. Performance investigation of a wind turbine–solar photovoltaic panels–*fuel cell* hybrid system installed at Incek region – Ankara, Turkey, *Energy Convers* 2016; 126: 759–766.
- Ganguly A., Misra D., & Ghosh S. Modeling and analysis of solar photovoltaic-electrolyzer-*fuel cell* hybrid power system integrated with a floriculture greenhouse, *Energy Build* 2010; 42 (11): 2036–2043.
- Gonnet A. E., Robles S., & Moro L. Performance study of a PEM *fuel cell*, *Int. J. Hydrogen Energy* 2012; 37 (19): 14757–14760.
- Han B., Steen S. M., & Zhang F. Y. Electrochemical performance modeling of a proton exchange membrane electrolyzer cell for hydrogen energy, *Int. J. Hydrogen Energy* 2015; 40 (22): 7006–7016.
- Ito H, dkk. Experimental study on porous current collectors of PEM electrolyzers, *Int. J. Hydrogen Energy* 2012; 37 (9): 7418–7428.
- Koponen J., dkk. Control and energy efficiency of PEM water electrolyzers in renewable energy systems, *Int. J. Hydrogen Energy* 2017; 42.
- Kurnia J. C., Sasmito A.P., & Shamim T. Performance evaluation of a PEM *fuel cell* stack with variable inlet flows under simulated driving cycle conditions, *Appl. Energy* 2017; 206: 751–764.



- Mert S. O., Dincer I., Ozcelik Z. Performance investigation of a transportation PEM *fuel cell* system, Int. J. Hydrogen Energy 2012; 37 (1): 623–633.
- Millet P., dkk. PEM water electrolyzers: From electrocatalysis to stack development, Int. J. Hydrogen Energy 2010; 35 (10): 5043–5052.
- O'Hayre R. *Fuel cell* Fundamentals. New York USA: John Wiley & Sons, Inc. 2017.
- Ou K., Yuan W. W., Yang S., & Kim Y. B., Performance investigation of a transportation PEM *fuel cell* system, Int. J. Hydrogen Energy 2012; 37 (1): 623–633.
- Ozden E., & Tari I. PEM *fuel cell* degradation effects on the performance of a stand-alone solar energy system, Int. J. Hydrogen Energy 2017; 42 (18): 13217–13225.
- Özgirgin E., Devrim Y., & Albostan A. Modeling and simulation of a hybrid photovoltaic (PV) module-electrolyzer-PEM *fuel cell* system for micro-cogeneration applications, Int. J. Hydrogen Energy 2015; 40 (44): 15336–15342.
- Pinar F. J., dkk. Performance of a high-temperature PEM *fuel cell* operated with oxygen enriched cathode air and hydrogen from synthetic reformat, Int. J. Hydrogen Energy 2015; 40 (15): 5432–5438.
- Seyhan M., dkk. Performance prediction of PEM *fuel cell* with wavy serpentine flow channel by using artificial neural network, Int. J. Hydrogen Energy 2017; 42 (40): 25619–25629.
- Siracusano S., dkk. Optimization of components and assembling in a PEM electrolyzer stack, Int. J. Hydrogen Energy 2011; 36 (5): 3333–3339.
- Tamalouzi S., dkk. Performances analysis of WT-DFIG with PV and *fuel cell* hybrid power sources system associated with hydrogen storage hybrid energy system, Int. J. Hydrogen Energy 2016; 41 (45): 21006–21021.
- Tijani A. S., & Rahim A. H. A. Numerical Modeling the Effect of Operating Variables on Faraday Efficiency in PEM Electrolyzer. Procedia Technol 2016; 26: 419–427.
- Waller M.G., Walluk M. R., & Trabold T. A. Performance of high temperature PEM *fuel cell* materials. Part 1: Effects of temperature, pressure and anode dilution, Int. J. Hydrogen Energy 2016; 41 (4): 2944–2954.
- Yang Z., Zhang G., & Lin B. Performance evaluation and optimum analysis of a photovoltaic-driven electrolyzer system for hydrogen production, Int. J. Hydrogen Energy 2015; 40 (8): 3170–3179.
- Zhang C., dkk. Dynamic performance of a high-temperature PEM *fuel cell* - An experimental study. Energy 2015; 90: 1949–1955



Lembar Tanya Jawab

Moderator : Aspiyanto (Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Serpong)
Notulen : Indriana Lestari (UPN "Veteran" Yogyakarta)

1. Penanya : Nur Hidayati (Universitas Muhammadiyah Surakarta)
Pertanyaan : Proses elektrolisa membutuhkan energi yang cukup besar. Seberapa besar energi yang dibutuhkan jika dibandingkan dengan energi listrik yang dihasilkan, apakah setimpal atau tidak?
Jawaban : Jenis membran apa yang digunakan?
: Penelitian ini hanya membahas performa dari sistem terintegrasinya dan tidak membahas efisiensinya. Pada dasarnya memang tidak setimpal, namun sasaran dari penelitian ini adalah memindahkan energi, misalnya dari Papua ke Sumatera, di Papua dibuat sel surya untuk menghasilkan hidrogen dan dipindahkan ke Sumatera untuk menghasilkan listrik. Membran yang digunakan adalah Nafion 117 dan berjumlah satu karena harganya mahal.
2. Penanya : Norma Sofiana (UPN "Veteran" Yogyakarta)
Pertanyaan : Tertulis bahwa ketika suhu operasi semakin meningkat maka *power* akan meningkat, apakah selalu dalam kondisi seperti ini atau adakah kondisi saat suhu naik tetapi *power* turun?
Jawaban : Berdasarkan persamaan terintegrasi, bahwa semakin tinggi suhu maka *power* akan semakin tinggi, namun kondisi tersebut dibatasi oleh kapasitas alat yang digunakan. Pada alat ini ketika suhu operasi mencapai 100 °C sudah melewati kapasitas alat. Jadi alat yang digunakan tidak optimum pada suhu 100 °C. Secara kinetika, kenaikan suhu akan meningkatkan kinetika reaksi baik di katoda maupun anoda. Keterbatasan alat pada suhu 100 °C ini dikarenakan kerja membran Nafion yang dibatasi oleh suhu. Membran Nafion tidak dapat bekerja pada suhu di atas 100 °C, karena pada suhu ini air akan menguap, sedangkan ketergantungan membran Nafion terhadap air sangat besar, sehingga membran akan mengalami kekeringan dan akibatnya tidak dapat mengalirkan proton dari anoda.